



Einstein et la pensée de Newton.

Michel Paty

► To cite this version:

| Michel Paty. Einstein et la pensée de Newton.. La Pensée, 1987, n°259, p. 17-37. halshs-00177336

HAL Id: halshs-00177336

<https://shs.hal.science/halshs-00177336>

Submitted on 7 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Einstein et la pensée de Newton

MICHEL PATY

CONTENU.

1. Chassés-croisés et renversements.- 2. L'enjeu épistémologique: continuité ou rupture ? - 3. La dimension newtonienne.- 4. La relativité et les concepts newtoniens.- 5. Causalité et lois différentielles. 6. Limites et dépassement.- 7. Epistémologies.- 8. Le programme fondamental.

1. CHASSES-CROISES ET RENVERSEMENTS.

Le rapprochement entre des oeuvres et des pensées appartenant à des époques et des contextes très différents, mais s'appliquant à des problèmes apparentés, voire en filiation, qui peut être source de contresens ou de malentendus si l'on s'en tient à l'apparence superficielle de certaines similitudes d'expression ou d'analogies, peut s'avérer au contraire très instructif sur la signification profonde de ces problèmes en tant qu'ils appartiennent à un champ de rationalité peu à peu mis au jour selon les données de sa logique propre. Il est intéressant de s'interroger, sous cet angle, sur le rapport de la pensée d'Einstein à celle de Newton, d'autant que le premier a souvent été qualifié de "Newton du vingtième siècle" (1) : qualification motivée non seulement par sa stature scientifique immense qui, comme Newton pour le sien, domine son temps, mais en ceci que ses travaux scientifiques majeurs ont renouvelé et même bouleversé l'héritage de ceux de Newton. Aux *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* qui fixèrent pour deux cents ans le cadre de la mécanique classique et de la théorie de la gravitation universelle, et à l'*Optique* qui régna pendant un siècle, dont la théorie corpusculaire de la lumière fut certes battue en brèche au dix-neuvième mais qui cependant établit les bases de l'optique physique par la théorie des couleurs, ont succédé respectivement les théories restreinte et générale de la relativité et la théorie des quanta de lumière qui, dans deux directions différentes, ont modifié radicalement les bases de la physique. Nous n'entrerons pas ici dans le détail de ces théories, et ce n'est pas notre propos d'en faire la comparaison. Nous voudrions seulement proposer des éléments de réponse à la question suivante : bien que les problèmes de la physique et, par-delà eux, ceux de la méthode scientifique, aient connu, de Newton à Einstein, des modifications déjà considérables (n'évoquons, pour la physique, que l'optique, et le développement de la théorie du champ électromagnétique, au dix-neuvième siècle), est-il possible de parler d'un rapport entre ces deux savants, et même, plus précisément, d'une influence du premier sur le second ? L'étude nous en sera facilitée, car c'est Einstein lui-même qui nous fournira pour l'essentiel les éléments de réponse : Einstein épistémologue, qui s'est interrogé de la façon la plus

précise - et la plus pénétrante - sur le problème de la continuité et de la rupture entre les conceptions newtoniennes et celles de la physique du vingtième siècle, qui a analysé à plusieurs reprises l'apport de Newton et s'est attaché à mettre en évidence ce que sa propre pensée devait à ce dernier.

Des œuvres scientifiques des deux savants et de leurs circonstances, que nous supposerons connues, retenons seulement quelques lignes générales qui se prêtent à la comparaison. Et, tout d'abord, bien sûr, l'*annus mirabilis* de l'un et de l'autre, 1665-1666 pour Newton, 1905 pour Einstein qui publia cette année-là cinq travaux fondamentaux et "révolutionnaires" dans trois directions distinctes : le mouvement brownien, les quanta de lumière, la relativité restreinte.

Mettons au chapitre des curiosités de simple analogie dans la formulation cette question posée par Newton dans les "Queries" du livre 3 de son Optique, par laquelle il se demande si "les corps n'agissent pas à distance sur la lumière et par cette action ne courbent pas ses rayons, et d'autant plus intensément que la distance est moindre?" (2). La formulation est troublante : ne semble-t-elle pas, prise à la lettre, anticiper l'une des trois prédictions de la relativité générale et l'observation de la déflexion des rayons lumineux au voisinage du Soleil réalisée lors de l'éclipse de 1919 ? Bien entendu, il n'en est rien, à strictement parler et si l'on restitue cette interrogation à son contexte, qui est celui d'un essai de concilier (par la théorie dite des accès de moindre réflexion ou transmission) les propriétés d'interférence de la lumière (anneaux "de Newton") et sa nature supposée corpusculaire, et qui est donc relatif à un domaine d'application bien différent : il s'agit d'une éventuelle propriété microscopique, portant sur le très proche voisinage des corps, et non d'une déflexion de trajectoire occasionnée par les grandes masses. Et pourtant ... la marge d'ambiguïté des conceptions de la nature de la lumière et de l'attraction, au sens de Newton, ne laisserait-elle pas la porte ouverte à une traduction plus proche des idées actuelles ? Mais là n'est pas l'essentiel.

Il est des rapprochements plus significatifs, ceux par exemple que désignent les étranges chassés-croisés de l'histoire des sciences et des idées. C'est ainsi que le physicien et historien de la physique, sir Edmund Whittaker, remarquait, dans les années 1930, en matière d'introduction à une ré-édition de l'*Opticks* de Newton, que les deux grandes théories de ce dernier, la gravitation d'une part, l'optique d'autre part, avaient connu avec la physique du vingtième siècle une fortune contraire (3). La première, qui avait régné jusque-là sans partage, se voyait supplantée par la Relativité générale (4), alors que la seconde, rendue caduque depuis un siècle par l'optique ondulatoire de Young et de Fresnel, refaisait surface avec les grains de lumière du même Einstein. Plus tard, la nécessité pour la mécanique quantique de concilier des effets de nature corpusculaire et ondulatoire n'était pas sans présenter des analogies avec les tentatives dans ce sens proposées par Newton (remarquons d'ailleurs qu'Einstein lui-même avait un temps, vers 1910, développé un modèle d'émission qui rappelait la théorie des accès). Mais ce rapprochement de l'optique et de l'atomisme newtoniens et de la théorie quantique de la radiation et de la matière trouve rapidement sa limite, puisque les atomes et les quanta de la physique moderne ont des propriétés très différentes de celles des corpuscules de Newton et demandent, tout autant - et, nous allons y revenir, même bien davantage - que l'espace-temps et le champ de la relativité, une modification de la mécanique newtonienne. C'est tout le cadre conceptuel et théorique de la physique de Newton qui se voyait renversé. Mais ce renversement, qui domine la

naissance et l'élaboration de la physique du vingtième siècle, s'effectuait précisément en opposition, et donc en relation, aux théories et aux conceptions newtoniennes : cette constatation rend manifeste le rapport étroit entre Einstein et Newton, rapport plus marqué, pour cette raison, que ceux, pourtant si forts, qui lient le premier aux oeuvres majeures et aux pensées des savants des périodes intermédiaires (et notamment Faraday et Maxwell, initiateurs du concept de champ).

2. L'ENJEU EPISTEMOLOGIQUE : CONTINUE OU RUPTURE ?

La nature de ce rapport présente d'ailleurs un enjeu épistémologique important relativement au thème de la continuité, ou de l'incommensurabilité, des théories. A ce titre, Howard Stein, tout en soulignant l'importance des changements conceptuels survenus de Newton à Einstein, remarquait que cette histoire est celle d'un développement et d'un approfondissement, au sein d'une tradition cohérente, et que les "Huygens, Newton, Maxwell et Einstein lui-même ont été des ouvriers de la même entreprise au progrès de laquelle ils ont tous contribué et que, en un sens, mais dans un sens d'une importance considérable, malgré les déplacements conceptuels, ils ont parlé un langage commun" (5). Abraham Pais constatait, pour sa part, que, alors que la relativité restreinte d'Einstein "représente l'achèvement du travail de Maxwell et de Lorentz, sa relativité générale achève la théorie de la gravitation de Newton et incorpore la conception proposée par Mach de la relativité de tout mouvement" ; et que, à cet égard, "l'œuvre d'Einstein représente le couronnement du travail de ses précurseurs, contribuant aux fondements de leurs théories et les révisant" (6).

Einstein lui-même estimait que les deux notions fondamentales les plus importantes de la théorie physique étaient, d'une part, "la théorie du mouvement des masses et de la gravitation que Newton nous a donnée", et, d'autre part, "le concept de champ électromagnétique, par lequel Faraday et Maxwell ont placé la physique sur une nouvelle base" (7). Et, exposant, en 1919, sa théorie de la relativité générale qui se présente, précisément, comme une reprise et une transformation de la gravitation newtonienne aboutissant à une théorie dont la "complétude logique" fait le principal attrait, il concluait, après avoir insisté sur les différences considérables qui existent entre les principes des deux théories : "Mais on ne doit, cependant, absolument pas penser que l'oeuvre puissante de Newton puisse être réellement dépassée par cette théorie, ni par aucune autre. Ses idées, si belles et lucides, garderont à jamais leur signification sans égale en tant que fondations de toute la structure conceptuelle de notre temps dans le domaine de la philosophie naturelle " (8).

Avec Newton, pour Einstein, le cadre fondamental de la pensée physique était posé et se voyait appelé à être maintenu, même au travers de modifications aussi importantes que le furent celles occasionnées par la substitution, à une physique du point matériel, d'une physique du champ continu de matière. C'est ce que semble bien indiquer le rapprochement des deux citations qui précèdent. La direction même des travaux d'Einstein, et son choix d'un programme

pour la théorie physique - le programme du champ continu -, nous permettent, par leur seule considération, de voir avec plus de précision comment on peut l'entendre.

Déjà avec la relativité restreinte, le cadre de l'espace et du temps proposé par Newton s'était vu modifié de façon substantielle ; cette modification fut radicalisée encore avec la géométrisation de la loi de gravitation. Il n'est plus besoin de souligner la différence considérable, sinon la rupture, entre l'espace et le temps absolus, indépendants l'un de l'autre, cadre invariable des événements (même si ces derniers ne sont perçus que par des mouvements relatifs), et l'espace-temps qui systématise le point de vue des mouvements relatifs ; ou entre la masse, grandeur invariable affectée aux corps, représentant la quantité de matière qu'ils contiennent (selon la définition proposée par Newton) et la masse variable, équivalente à l'énergie, de la relativité restreinte; ou encore entre l'espace physique euclidien de la mécanique classique et celui à courbure de la relativité générale. La difficulté rencontrée par les contemporains pour admettre ces nouvelles notions illustre assez les différences, et le caractère de bouleversement de telles substitutions.

Pourtant, des éléments de permanence - et des éléments de nature fondamentale - se manifestent au travers de ces changements mêmes : l'appel à un principe de relativité des mouvements, qui se rattache au principe d'inertie, première des trois lois fondamentales de la mécanique newtonienne, et qui se trouve présent dès les travaux de Galilée, Descartes, Newton ; l'espace-temps continu, cadre conceptuel des phénomènes physiques et de leurs lois ("le continuum spatial", précisera Einstein, "a fait son entrée dans la science avec l'invention de la géométrie analytique par Descartes" (9)) ; l'expression de ces lois en termes d'équations différentielles (équations aux dérivées partielles, certes, à la différence de Newton, mais dans le droit fil de son instauration du calcul différentiel) ; enfin, et en raison précisément de ce dernier aspect, affirmation d'une causalité qui exprime les lois exactes du mouvement des corps, et qui préside encore au programme de la relativité générale et de la théorie du champ. En somme, malgré les changements de concepts, il y a, de la physique newtonienne à celle du champ continu défini dans l'espace-temps, une même direction de pensée, qui peut être considérée comme l'axe principal de développements allant dans un même sens, et que résument les expressions équivalentes : équations différentielles, continuité-causalité.

En suivant le programme d'une théorie du champ, inauguré par Faraday et Maxwell, Einstein avait peut-être au début davantage conscience des différences et des ruptures avec la mécanique de Newton que des continuités. Certes, ses "maîtres" étaient Helmholtz, Hertz, Boltzmann, qui avaient voulu ramener les propriétés physiques de la matière et du rayonnement à la mécanique ; mais c'étaient aussi bien, avec Wien, Lorentz, Mach, Poincaré, les physiciens qui soulignaient les limites de la mécanique et qui, soit comme Mach la critiquaient d'une manière fondamentale, soit comme les trois autres (et surtout les deux premiers), proposaient de la supplanter en mettant en avant les exigences de l'électromagnétisme. Mais il est vrai que, même dans ce programme (Mach excepté), le cadre conceptuel de l'espace et du temps newtoniens était maintenu.

Einstein était bien conscient de ces transformations, et de la continuité en même temps que de la rupture avec Newton. Mais comment les voyait-il exactement ? Dans quelle mesure fût-il influencé directement par Newton ? et

quand l'a-t-il lu ? Il est intéressant, sur le sujet de savoir comment la pensée d'Einstein suit celle de Newton ou rompt avec elle, de s'attacher à ce qu'il en a reçu et à ce qu'il a dit de lui.

Il s'est prononcé à diverses reprises sur Newton, soit au détour de considérations sur l'évolution de la physique, soit en des circonstances directement inspirées par l'auteur des Principia. . Newton lui apparaissait comme l'un des plus grands physiciens de tous les temps, avec Galilée, Faraday, Maxwell, et, plus près de lui, Lorentz et Planck. Mais il en parle surtout après son élaboration de la relativité générale. Newton apparaît bien peu dans ses écrits de la période précédente, en particulier ceux sur la relativité restreinte, et ce n'est pas seulement parce qu'il n'a pas encore développé sa pensée épistémologique dans des écrits spécifiques, car cette pensée est lisible dans les textes scientifiques proprement dits, et dès les premiers. Mais la relativité restreinte est élaborée dans un contexte tributaire de Lorentz beaucoup plus que de Newton, lequel apparaît surtout à travers la critique de Mach, prolongée de manière décisive par Einstein. Des deux motivations premières de la relativité générale, la première est encore sur le mode de la critique de Newton : le statut privilégié, sans raison autre qu'arbitraire, du système d'inertie (et c'est encore une considération de Mach qui inspire son analyse, par la critique d'effets physiques rapportés à la seule existence d'un espace absolu). Mais la seconde fait apparaître la continuité davantage que la rupture : c'est la remarque de l'égalité des masses inertielle et gravitationnelle, dont Einstein souligna qu'elle avait été faite Newton, mais que celui-ci ne pouvait alors y voir autre chose qu'une circonstance fortuite (10).

Il y a ici un élément qui va bien au-delà du seul souci historique : cette égalité, décisive pour les développements ultérieurs puisque c'est elle qui va suggérer immédiatement la généralisation du principe de relativité à tous les systèmes de coordonnées en mouvement quelconque, ne pouvait être désignée que dans le cadre du système de la mécanique newtonienne. Lorsqu'Einstein lui-même l'expose, par exemple dans la troisième de ses quatre conférences de 1921 à l'université de Princeton (11), c'est en écrivant les équations de Newton de la proportionnalité de la force à l'accélération et l'expression de la loi d'attraction ; que, dans ces conférences, Einstein laisse de côté tout souci historique, pour proposer une formulation des concepts et des équations de la relativité et de la théorie de la gravitation au plus près des éléments essentiels nécessaires (d'ailleurs dans le formalisme du calcul tensoriel invoqué dès les premières définitions et les reconstructions des concepts de la mécanique elle-même), cela rend plus frappant encore le recours aux exactes expressions newtoniennes. Au demeurant, Einstein insista à de nombreuses reprises sur l'origine newtonienne de ces concepts et de leur identification. Une formulation particulièrement nette à cet égard est donnée dans un texte inédit de 1920, où, après avoir noté les relations exprimant indépendamment les deux masses, il écrit : "On peut ainsi considérer, dans l'esprit de la mécanique newtonienne, le fait expérimental de la chute libre égale pour tous les corps comme la loi de l'égalité de la masse inertielle et de la masse gravitationnelle", ajoutant, à l'égard de cette loi que, "dans l'optique de la mécanique newtonienne, elle ne peut en aucun cas être considérée comme triviale" (12). En rapportant précisément cette égalité à une cause plus profonde, ce qui amenait à l'établir en principe, Einstein prolongeait la démarche newtonienne ; en

ce sens, on peut dire que sa théorie de la gravitation se développe à partir de celle de Newton.

Cette circonstance a peut-être déterminé une attention plus directe d'Einstein à la pensée de Newton ; c'est en effet à partir des textes de cette période qu'il se réfère fréquemment, dans ses écrits sur la relativité, à l'auteur des *Principia* en invoquant son héritage. Bien entendu, la référence à Newton, dont la pensée domine la mécanique et la physique classique, est implicite dès les premiers travaux d'Einstein, mais il s'agit alors pour l'essentiel d'un cadre donné, qu'il a fallu secouer ; c'est Newton à travers ses critiques. Après la relativité générale, Newton apparaît directement ; mais, outre la raison mentionnée, sans doute est-ce aussi, plus généralement, parce que, entre la théorie de la gravitation de Newton et celle d'Einstein, il ne se présente aucun intermédiaire, et la succession (continuité et rupture) se manifeste dans toute son évidence. C'est elle, d'ailleurs, qui inspirera beaucoup plus tard à Einstein son fameux : "Newton, pardonne-moi !" (13).

3. LA DIMENSION NEWTONIENNE.

Qu' Einstein se soit porté directement vers les textes de Newton, le contenu de sa propre bibliothèque (14) et plusieurs écrits de sa plume, dont de brèves préfaces à des ouvrages (rééditions d'œuvres de Newton, ou livre sur ce dernier) en témoignent. Il notait, dans un avant-propos à une ré-édition anglaise de *L'Opticks*, en 1931, que, "si les découvertes de Newton sont passées dans le patrimoine de la connaissance reçue", il n'en demeure pas moins que la lecture de son oeuvre est irremplaçable pour peu que nous voulions jouir "d'un aperçu de l'activité personnelle de cet homme exceptionnel" (15). Exceptionnel, Newton l'est, à ses yeux, pour sa position propre à un stade décisif du développement de la science, qu'il s'agisse de la physique théorique et expérimentale, ou de la méthode scientifique elle-même. C'est dans ce sens qu'il parle, pour célébrer le deux-centième anniversaire de la mort du savant, de "cet esprit éblouissant qui a montré, comme nul autre, ni avant, ni après, ne l'a fait, le chemin de la pensée occidentale, de la recherche comme de la pratique". Et Einstein ajoute : "Ce n' est pas seulement en découvrant des méthodes et des procédures directrices particulières qu'il a montré son génie inventif, mais par sa maîtrise sans égale des données empiriques dont on disposait à son époque, ainsi que par sa merveilleuse créativité dans les démonstrations les plus précises en mathématiques et en physique" (16).

Mais le caractère exceptionnel de la figure de Newton ne tient pas qu'à ces seules qualités : il tient aussi à la situation particulière où l'histoire l'a placé, "à un moment décisif dans le développement intellectuel du monde". Ce moment, Einstein le décrit d'un mot : la pleine acception de la causalité (17) ; et cet accomplissement, dépassant la seule mécanique, allait "constituer le programme de toute la recherche en physique théorique jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle", dans la mesure où les phénomènes physiques dans leur ensemble devaient, selon ce programme, "être rapportés à des masses soumises à la loi du mouvement de Newton". L'optique ondulatoire elle-même était redevable de ces lois du mouvement, "appliquées à des masses diffuses de matière continue" ; la théorie cinétique de la chaleur reposait sur ces lois, préparant la reconnaissance des deux

principes de la thermodynamique (le premier, celui de la conservation de l'énergie, mais également le second, "par une compréhension en profondeur" de sa nature, entendons par l'interprétation statistique). Quant à la théorie de l'électromagnétisme et de l'optique de Faraday et de Maxwell, "qui a représenté le progrès le plus avancé en ce qui concerne les principes fondamentaux de la physique théorique depuis Newton", c'est encore sous le signe des idées de ce dernier qu'elle a trouvé son accomplissement. Et "ni Maxwell ni Boltzmann, ni Lord Kelvin ne se lassèrent jamais d'essayer sans cesse de ramener les champs électromagnétiques et leur action mécanique réciproque à des processus mécaniques produits dans des masses hypothétiques à distribution continue", bien que leurs efforts dans ce sens se soient en fin de compte avérés infructueux (18). Dans un autre texte de la même année (19), Einstein célèbre en Newton celui qui "a conçu les notions fondamentales de la mécanique et de la causalité physique" et déclare que "quiconque participe à sa modeste mesure à la méditation sur les secrets des phénomènes physiques (...) se joint à l'admiration et à l'amour qui nous lie à Newton", car "tout ce qui s'est accompli en physique théorique" depuis ce dernier est en quelque sorte, pour une grande part (l'exception étant la physique quantique), "le développement organique de ses idées" : la transformation de la force comme réalité indépendante et son dépassement dans le concept de champ par les travaux de Faraday, Maxwell et Lorentz ; le remplacement des équations différentielles de Newton exprimant la causalité, par des équations différentielles partielles ; la transformation de l'espace absolu et fixe de Newton "en un cadre décisif pour la physique par la théorie de la relativité". En quelque sorte, les idées fondamentales de Newton sont toujours présentes, même au travers de concepts transformés (20).

Avant de revenir de façon plus précise sur la manière dont Einstein analysait l'héritage de Newton en ce qui concerne la théorie de la relativité, et sur les limites qu'il assignait malgré tout aux innovations du grand homme, attardons-nous un instant à l'un des aspects, peut-être le plus caractéristique aux yeux d'Einstein, de son profil de savant. Il est mentionné dans la brève préface déjà citée à la réédition de *l'Opticks* : le caractère d'exception de Newton tient aussi, aux yeux d'Einstein, à ce qu'"il combinait à lui seul l'expérimentateur, le théoricien, le mécanicien et, ce qui n'est pas en reste, l'artiste dans la manière d'exposer" (21). Selon Abraham Pais (22), en louant Newton de ces qualités, Einstein décrivait son propre idéal : il aurait voulu être aussi bien expérimentateur que théoricien. Chez Newton ce double aspect se marque en particulier, précisément, dans le domaine de l'optique ; et Einstein d'énumérer le contenu de l'Optique de Newton : "la réflexion, la réfraction, la formation des images par les lentilles, le mode de fonctionnement de l'œil, la décomposition et la recombinaison spectrale des diverses sortes de lumière, l'invention du télescope à réflexion, les premières fondations de la théorie des couleurs, la théorie élémentaire de l'arc-en-ciel, passent en un défilé qui se clôt sur ses observations relatives aux couleurs des pellicules minces, lesquelles allaient être à l'origine du prochain grand progrès théorique, qui devrait attendre une centaine d'années avec la contribution de Thomas Young" (23). Il convient de noter que, si Einstein ne fut pas l'expérimentateur qu'il eût aussi souhaité être, ses recherches théoriques furent guidées par un sens physique toujours soucieux de se rapporter aux phénomènes ; et l'expérience tient dans sa pensée, bien qu'il ne fût pas un "empiriste", un rôle considérable. Son appréciation

de l'importance de Newton comme expérimentateur en offre une confirmation précieuse.

Il est à cet égard significatif que, dans sa conférence à Londres de 1921 dans laquelle il se référait à Newton, Faraday et Maxwell, Einstein ait tenu à souligner d'emblée que la théorie de la relativité se trouve dans la continuation de la ligne de pensée, représentée par les oeuvres de ces savants, qui veut "mettre la physique théorique en accord exact, autant qu'il est possible, avec les faits d'observation" (24). Ainsi, ce même souci, qui a conduit "à abandonner certaines idées connectées à l'espace, au temps, et au mouvement considérés comme des entités fondamentales", n'est pas étranger à l'esprit qui guidait les recherches de Newton, et cette raison, qu'on ne saurait surestimer, s'ajoute à celles que nous avons déjà évoquées.

4. LA RELATIVITE ET LES CONCEPTS NEWTONIENS.

C'est évidemment par rapport à la théorie de la relativité que les analyses d'Einstein sur les conceptions newtoniennes sont importantes, puisque sa théorie (restreinte et générale), en tant que réforme du système newtonien (mécanique classique et théorie de la gravitation), suppose la connaissance de ce dernier, dans la mesure où l'on veut comprendre "intuitivement" (au sens de cette "intuition physique" sur laquelle Einstein lui-même a si souvent insisté) les concepts fondamentaux et la démarche qui a conduit Einstein à son élaboration (25). Lorsqu'il évoque les concepts newtoniens considérés en eux-mêmes, c'est essentiellement en tant qu'ils participent d'un système cohérent, ordonné à la réalisation du projet qui marque par rapport à la physique antérieure une modification décisive (l'instauration d'une causalité fondamentale) ; c'est par rapport à un tel système que ces concepts trouvent à la fois leur justification et la marque de ce qui apparaîtra plus tard comme leur irrémédiable limitation, rapportée non pas tant à la relativité restreinte qu'aux exigences posées par la relativité générale.

Décrivant le passage qui, de Galilée à Newton, marque un progrès caractérisé dans la compréhension des lois du mouvement, Einstein voit ce progrès dans la substitution du concept de mouvement global par celui de mouvement différentiel (nous allons y revenir à propos de la causalité), formulée par l'interrogation suivante : "comment l'état de mouvement d'un point matériel change-t-il dans un temps infiniment court sous l'influence d'une force extérieure ?" (26). Newton put résoudre ce problème et "parvenir à une formulation qui s'applique à tout mouvement quel qu'il soit" en mettant au point un système de concepts lui permettant d'exprimer des lois différentielles : il emprunta le concept de force à la statique, et, pour le relier à celui d'accélération, introduisit le nouveau concept de masse, bien qu'en l'établissant "sur une définition illusoire" (27). Ce faisant, Newton élaborait la base conceptuelle de son édifice rationnel qu'allait couronner la loi causale de la gravitation universelle ; il est intéressant de noter l'insistance d'Einstein sur le caractère abstrait d'un système qui se donnait une grande cohérence (et même, avec la loi d'attraction des masses, une grande complétude) logique (28). C'est dans un tel système conceptuel que se voient définis l'espace et

le temps newtoniens, conçus comme des entités absolues et séparées - double caractère que la relativité devait abolir, les remplaçant par un "espace-temps absolu" (29).

Einstein montre bien la solidarité qui lie les concepts dans la physique newtonienne : pour celle-ci (30), l'espace et le temps doivent avoir une réalité indépendante l'un de l'autre et indépendante de la matière car, dans les lois du mouvement, apparaît le concept d'accélération. Cette dernière ne peut être, dans la théorie de Newton, qu'"accélération par rapport à l'espace", et l'espace doit être en repos, sans accélération, pour que, précisément, le concept d'accélération ait une signification. Il en va de même pour le temps. Et Einstein de commenter que Newton, aussi bien que la plupart de ceux qui, parmi ses contemporains, critiquaient ses vues, voyaient bien quelque problème dans le fait d'attribuer la réalité physique à la fois à l'espace lui-même et à son état de mouvement : "Mais il n'y avait pas d'autre alternative à cette époque".

Poutre maîtresse du système de pensée de Newton, l'espace absolu apparaît, doué de ses propriétés, comme une nécessité logique de la construction. Einstein voit dans l'espace de Descartes (l'espace géométrique est identifié aux corps matériels) et dans celui de Newton (réceptacle vide des corps matériels, existant indépendamment d'eux), deux constructions possibles, chacune caractérisée par un système conceptuel dans lequel elle s'insère (31). L'espace au sens de Newton est requis pour rendre compte de l'accélération, et, par là, apparaît doué de propriétés physiques, ce qui le différencie de l'espace purement géométrique bien qu'il en ait aussi les propriétés (homogénéité, isotropie, indépendance des corps matériels) (32). "L'idée fondamentale de la mécanique de Newton", écrit Einstein dans son texte de 1930, "fut d'introduire la notion de force - c'est-à-dire l'accélération. L'accélération ne peut être imaginée qu'en référence à un corps réellement rigide. C'est une très belle réussite du génie de Newton d'avoir pu aller jusqu'à donner à l'espace une réalité physique définie" (33).

Dans un écrit antérieur, reprenant les analyses de Mach, Einstein soulignait que "l'accélération qui figure dans les équations du mouvement de Newton est incompréhensible si l'on part du concept de mouvement relatif. Cela obligea Newton à inventer un espace physique par rapport auquel on suppose que l'accélération a lieu" (34). A quoi il ajoutait : "Cette introduction *ad hoc* du concept d'espace absolu, bien qu'elle soit logiquement admissible, semble néanmoins insatisfaisante" (35).

Un texte de 1927 est plus explicite encore en décrivant le caractère de nécessité de l'espace absolu à l'intérieur du système de pensée de Newton. On le lui a reproché comme échappant au conditionnement de l'expérience. Pourtant, remarque Einstein, Newton fut cohérent aussi sur ce point. Il s'est toujours efforcé de présenter son système comme une nécessité essentiellement conditionnée par l'expérience, "en introduisant un minimum de concepts qui ne soient pas référés directement à des objets empiriques", et son introduction de l'espace et du temps absolu s'inscrit pourtant dans cet effort. Le paradoxe n'est qu'apparent, et Newton manifeste la consistance de sa position, car c'est en référence à l'expérience qu'il démontre l'insuffisance des seules grandeurs géométriques observables (comme les distances respectives entre points matériels), pour rendre compte complètement du mouvement physique : par son expérience du seau. Il fallait introduire un concept supplémentaire, entre ceux de masses et de distances variant avec le temps, pour

caractériser complètement les propriétés du mouvement : "ce *quelque chose*, il le désigna comme la relation à l'*espace absolu*". Ainsi Newton était-il parfaitement conscient de ce que "si les lois du mouvement ont une signification quelconque, l'espace doit posséder une sorte de réalité physique du même ordre que les points matériels et des distances" (36).

Sur le caractère physique de l'espace newtonien, Einstein insiste diversement dans ses commentaires. Tantôt (dans les textes de 1921) c'est son introduction *ad hoc* qui tend à retenir surtout sa critique, dans la mesure où il s'agissait d'une limitation définitive qui devait exiger une substitution radicale. C'est ainsi qu'il décrit l'impossibilité, dans le système conceptuel newtonien, de penser l'équivalence d'un champ de gravitation et d'un champ d'accélération (ce dernier étant déterminé par l'inertie, comme par exemple la force centrifuge). "La même propriété", expose Einstein à propos de la genèse de la Relativité générale, "qui est regardée comme *inertie* du point de vue d'un système qui ne prend pas part à la rotation" (celle, par exemple, de la Terre), "peut être interprétée comme *gravitation* quand on la considère par rapport à un système qui participe de la rotation. Une telle interprétation est impossible pour Newton, parce que, selon sa loi, le champ centrifuge ne peut pas être regardé comme étant produit par la matière, et parce que, dans sa théorie il n'y a pas de place pour un champ "réel" du type du "champ de Coriolis"" (37). Ceci, en raison du fait que les accélérations et l'inertie sont dues à un espace absolu, dont elles expriment, certes, le caractère physique, mais d'une manière totalement distincte de la matière que cet espace contient. Entre l'espace contenant et la matière contenue, il n'est pas de réciprocité, pour Newton : l'espace absolu agit sur la matière, mais non l'inverse. La seule possibilité de dépasser cette limitation devait être de remplacer le concept d'objet matériel par celui de champ (38).

Mais à d'autres moments (comme dans le texte de 1927 cité plus haut), Einstein insiste sur l'importance, malgré ces limites, de l'attribution d'un caractère physique à l'espace par Newton : cette insistance est, à vrai dire, tributaire de son programme d'alors, orienté dans le sens d'une géométrisation de l'ensemble des propriétés physiques de la matière. Dans le texte de 1930, qui est précisément écrit dans cette perspective, il déclare : "Il (Newton) l'a inclus (l'espace) parmi les autres réalités. Cet aspect de la théorie n'a pas été compris ou a été négligé ou mal interprété par certains de ses successeurs. (...) Il a échappé à Kant lui-même." (39). Cette dernière remarque montre assez combien le caractère physique de l'espace newtonien interdit de l'identifier à de simples catégories pures de l'entendement, ou formes *a priori* de la sensibilité : sans quoi on comprendrait mal que l'espace matériel de la relativité générale ou la représentation géométrique du champ unifié pussent en quoi que ce soit y trouver leur origine. La mise au point, on le voit, est d'importance. Einstein insistait sur la différence entre l'espace newtonien, vide mais néanmoins physique, et l'espace rempli d'éther de la physique du dix-neuvième siècle (40). Peut-être cette dernière conception pouvait-elle être conciliée avec la conception kantienne de l'espace ; mais pas celle de Newton.

Le caractère physique de l'espace absolu newtonien revêt, pour Einstein, les deux aspects suivants (41) : d'une part, l'espace exprime "la quintessence des possibilités de positionnement des corps", et par cet aspect, il est *espace-receptacle*, "indépendant de toute cause physique", représentant "quelque chose qui est absolu en soi" (42) ; d'autre part, il constitue un système *dynamique*

de référence. En distinguant ces deux aspects, Einstein éclaire ce qui va, à ses yeux, constituer l'idée essentielle de la relativité générale et du programme de la théorie du champ : c'est leur réunification opérée notamment par la substitution au premier d'un espace (non euclidien) dans lequel les positions d'un corps donné ne sont plus indépendantes des positions des autres corps, ce qui dès lors "établissait un pont entre la géométrie et la physique". Dans ce changement, la théorie de la relativité restreinte n'intervient qu'au titre d'avoir préparé le terrain à la relativité générale ; car elle maintenait le caractère "absolu en soi" d'un phénomène d'espace-temps "dans la mesure où ce dernier était indépendant de l'état particulier du mouvement considéré dans la théorie " (43).

Certes, la relativité restreinte établit un lien entre l'espace et le temps, mais - Einstein y insiste dans plusieurs textes - elle n'est que la conséquence logique des modifications requises par l'introduction du concept de champ (par Faraday et Maxwell) ; la vitesse finie de propagation du champ entraînera la ruine de l'idée d'action instantanée et de la simultanéité absolue (44). Ce n'est qu'avec la relativité générale que l'espace et le temps devaient être "dépouillés non pas de leur réalité, mais de leur caractère causal absolu par lequel ils affectaient les corps sans en être affectés" (45). Pour cette raison, aux yeux d'Einstein, le changement proposé sur la conception de l'espace par la relativité restreinte n'est pas si grand ; son importance est moindre que l'introduction du concept de champ qui représente, dans cette évolution, une étape considérable, par ses implications (46). C'est, en particulier, au travers du développement de la notion de champ que le caractère physique de l'espace prendra progressivement sa pleine mesure : d'abord par le biais d'un éther - étape provisoire motivée par le contexte conceptuel newtonien dans lequel s'instaurent l'optique ondulatoire et la théorie électromagnétique -, éther qui se présente comme un conditionnement du caractère physique de l'espace en tant que lieu de propagation du champ, dans la mesure où l'espace absolu de Newton était insuffisant à cet égard (47) ; puis par la théorie du champ de gravitation qui, en un sens, restituera un éther, au sens d'espace *physique* (48), l'éther précédent ayant été démontré inutile par la relativité restreinte. Telle est la signification de l'évocation proposée dans le texte cité, centré autour du caractère physique de l'espace dans la mesure où il décrivait l'état actuel - en 1930 - des idées d'Einstein, vers une géométrisation de la théorie physique, et selon lesquelles "l'espace devrait être regardé comme premier, la matière en étant dérivée, pour ainsi dire, à titre de résultat secondaire", moyennant l'établissement d'une métrique appropriée (49).

Un texte postérieur (Einstein 1954a, p. XIV) exprime bien l'ambivalence du concept newtonien d'espace absolu, de caractère physique dissymétrique par rapport à la matière : d'une part, Newton a pleinement compris (et ceci constitue l'une de ses plus grands accomplissements) que l'espace doit être conçu comme la cause indépendante de l'inertie des corps (dans la ligne de pensée ouverte par Galilée, dont il tire les pleins conséquences), "et sa décision était, dans l'état de la science d'alors, la seule possible, et en particulier la seule féconde"; mais les développements ultérieurs du problème (il s'agit ici de la nature de l'inertie) "ont montré que la résistance de Leibniz et Huygens, intuitivement bien-fondée mais étayée sur des arguments inadéquats, était en fait justifiée". Et s'il a été difficile de parvenir au concept d'espace indépendant et absolu "indispensable au développement de la théorie", "le dépassement de ce concept n'a pas demandé

moins d'efforts (et c'est un processus qui n'est probablement pas encore achevé)". Utile temporairement, devenu indispensable par son succès, le concept d'espace absolu était, comme tous les concepts, fruits d'une construction inscrite dans un développement historique, un concept provisoire.

5. CAUSALITE ET LOIS DIFFERENTIELLES.

C'est, d'une manière générale, le plein développement de l'idée de causalité qui apparaît à Einstein comme l'apport le plus fondamental de Newton, puisqu'il allait mettre en branle pour l'essentiel le programme de la théorie physique, comme on l'a vu. Ce thème est au centre du texte le plus détaillé qu'il aîť consacré à l'auteur des *Principia*, à l'occasion du bicentenaire de sa mort, texte déjà cité à plusieurs reprises. Il est intéressant de voir comment Einstein caractérise ce qui fait la nouveauté de Newton par rapport à ses prédécesseurs - et il est significatif que, dans ce texte, Einstein insiste sur la théorie de la gravitation, rendue possible parce que Newton a posé le problème en termes de causalité différentielle.

C'est en effet par le rappel des travaux de Kepler qu'il commence son évocation : Kepler qui avait établi les lois empiriques du mouvement des planètes à partir des travaux de Tycho Brahé. "Ces lois, il est vrai", expose Einstein, "donnaient une réponse complète à la question de savoir *comment* les planètes se meuvent autour du soleil (...) . Mais elles ne satisfont pas l'exigence d'une explication causale". En particulier, elles se présentent sous la forme de "trois règles logiquement indépendantes, sans connexion les unes avec les autres" (50) ; mais, surtout, "ces lois sont ordonnées au mouvement considéré comme un tout, et non pas à la question de savoir *comment l'état de mouvement d'un système donne lieu à ce qui suit immédiatement dans le temps* ; ce sont des lois intégrales et non pas différentielles ..." (51). Or, telle était la question que Newton se posait : "y a-t-il une règle simple par laquelle on puisse calculer complètement les mouvements des corps célestes dans notre système planétaire, quand on connaît, à un instant donné, l'état du mouvement de tous ces corps ?" (52).

Cette claire conception des lois différentielles comme seules capables de satisfaire complètement l'exigence de causalité (telle qu'elle s'exprime aux yeux du physicien d'aujourd'hui) constitue l'une des réalisations intellectuelles les plus importantes de Newton (53). Mais cette conception de la causalité à elle seule ne suffisait pas ; elle ne pourrait aboutir qu'à la condition d'améliorer, de systématiser, un formalisme mathématique jusqu'alors rudimentaire, et Newton fit, là encore, oeuvre de fondateur en inventant le calcul différentiel et intégral (54).

Quant à Galilée, il avait formulé les deux lois de l'inertie (55) et de la chute libre sous l'action de la pesanteur terrestre ; mais, bien que ces lois soient fondamentales pour la théorie de la gravitation et que, à cet égard, "il puisse nous sembler aujourd'hui qu'il n'y a qu'un petit pas des découvertes de Galilée à la loi du mouvement de Newton", ici encore les énoncés de Galilée concernaient le mouvement comme un tout, alors que la loi du mouvement de Newton porte sur sa détermination causale et différentielle quant au changement du mouvement d'une masse ponctuelle, d'un instant donné à l'instant suivant (56). Mais cela seul ne suffisait pas encore à établir pleinement la causalité du mouvement : il y fallait une

loi donnant la force : et c'est "sans aucun doute inspiré par la loi des mouvements planétaires que Newton conçut l'idée que la force agissant sur une masse est déterminée par la position de toutes les masses situées à une distance suffisamment petite de la masse en question" (c'est-à-dire de la loi en mm'/d^2). C'est la combinaison "*loi du mouvement plus loi de l'attraction*" qui accomplit ce programme, au travers de la découverte de l'identité de nature de la force agissant sur les objets célestes et de la gravité, et cette combinaison "constitue ce merveilleux édifice de la pensée qui donne la possibilité de calculer les états passés et futurs d'un système à partir de l'état donné à un certain moment, du moins si les événements ne sont soumis qu'à la seule influence des forces de gravitation". De la sorte, Newton est parvenu à une formulation *déductive* des lois des mouvements de la Terre et des objets planétaires dans tous leurs détails (planètes, comètes, marées, précession de l'axe de la Terre), qui "constitue un accomplissement d'une grandeur unique". C'est donc en même temps leur expression quantitative exacte et leur caractère déductif à partir d'une formulation logiquement complète qui fait le caractère achevé des lois du mouvement de Newton, dès lors appelées à servir de base, tant pratique que logique, de la science de la mécanique (57). Et, sur le sujet de l'innovation propre à Newton par rapport à ses devanciers, il est utile de mentionner ici un autre texte, dans lequel Einstein établit un parallèle entre "le couple Faraday-Maxwell" et le "couple Galilée-Newton", lesquels ont entre eux une forte ressemblance en ceci que "le premier de chaque couple saisit intuitivement les relations et l'autre les formule avec rigueur et les applique quantitativement" (58).

En terminant sur le chapitre de la causalité, il convient de souligner la référence - peu commune avant Einstein, concernant une théorie physique - faite à la *complétude* de la théorie de Newton : elle est suggérée à une période où Einstein lui-même pose désormais la complétude comme le critère décisif d'une théorie satisfaisante, dans sa recherche d'une théorie unifiée comme dans ses critiques à la mécanique quantique (59). Einstein la définit ainsi : "la complétude logique du système de Newton réside en ceci que les seules causes d'accélération des masses d'un système, *ce sont les masses elles-mêmes*" (60). C'est une complétude insuffisante et toute provisoire certes, en raison des limitations propres au système de Newton, mais elle indique une direction pour la logique de la pensée physique, qui est, aux yeux d'Einstein, fondamentale.

6. LIMITES ET DEPASSEMENT.

Nous avons vu comment les commentaires d'Einstein sur Newton sont toujours marqués par le souci de souligner une continuité de pensée, même quand il s'agit d'exposer les modifications substantielles que la physique a dû imposer aux conceptions héritées de Newton. Mais nous savons par ailleurs que ces modifications ne furent pas si aisées à concevoir et à faire aboutir, notamment parce que les conceptions de Newton avaient été figées dans un dogmatisme qu'Einstein lui-même fit éclater et qu'il évoque à d'autres occasions, notamment à propos de Mach qui "fut le premier à ébranler le dogmatisme" (61). Mais ce dernier fut davantage le fait des successeurs que celui de Newton lui-même dont Einstein considère qu'il se rendait compte des limites de son système : car le dogmatisme

s'instaure précisément lorsque sont abolies la distance et la critique. Que "Newton lui-même (fût) bien plus conscient des faiblesses inhérentes à son édifice intellectuel que les générations ultérieures de savants formés à ces idées (...) ce fait a toujours suscité de ma part une profonde admiration" (62), écrit Einstein, qui sut lui-même constamment garder une distance critique à l'égard des théories les mieux établies, y compris celles qu'il utilisait.

Ces limitations, Einstein les voit dans trois directions. La première est celle de l'espace (et du temps) absolu, alors qu'il ne correspond pas à un concept qui puisse être rapporté à l'expérience, mais qui possède, dans le système conceptuel newtonien, une cohérence logique, comme nous l'avons vu (63). La seconde est celle des forces d'action instantanées à distance qui, "telles qu'elles ont été introduites pour représenter les effets de la gravité, sont d'un caractère très différent de la plupart des processus familiers de la vie de tous les jours" ; Newton, qui d'ailleurs entretenait des doutes sur ces concepts (64) répondait à cette objection en soulignant qu'il ne s'agissait pas là "d'une explication définitive mais d'une loi déduite de l'expérience par induction" (65). La troisième limitation des concepts newtoniens réside dans le caractère purement fortuit de l'égalité des masses inertielle et pesante : mais, là encore, "Newton lui-même était conscient de la particularité de ce fait" (66). Cependant, aucune de ces trois difficultés ne constituait une objection logique à la théorie ; elles représentent seulement, estime Einstein, "les désirs insatisfaits de l'esprit scientifique dans sa lutte pour parvenir à une vue complète et unifiée des phénomènes naturels" (67).

L'évocation par Einstein des développements de la théorie physique montre la rationalité propre au champ des problèmes abordés, tels qu'ils se trouvaient définis dans le cadre de la pensée newtonienne, en insistant précisément sur ces limitations et sur la manière dont leur dépassement apparaît rétrospectivement comme inéluctable (68). La théorie du champ, conçue à partir des phénomènes électromagnétiques, porta un premier coup à la physique newtonienne par la propagation à vitesse finie du champ qui devait supprimer l'action instantanée et la simultanéité, et détrôner les concepts de base de la mécanique ; il allait revenir à la théorie de la relativité générale de développer plus avant le programme d'une théorie du champ, en modifiant substantiellement, d'un point de vue qualitatif, la théorie de Newton, qui en représente désormais un cas limite (69). En fin de compte, aux yeux d'Einstein, toute cette évolution de nos conceptions "peut être considérée comme un développement organique des idées de Newton" (70).

7. EPISTEMOLOGIES.

"Heureux Newton ! bienheureuse enfance de la science !" s'écrie Einstein dans sa préface à la réédition de *L'Optique*. L'exclamation ne désigne pas tant le bonheur d'une recherche féconde qu'un certain âge d'or de la science classique pour lequel le rapport de la pensée à la nature ne posait pas de problème majeur. "La nature lui était un livre ouvert", commente en effet Einstein, "dont il pouvait sans effort déchiffrer les lettres. Les conceptions par lesquelles il ramenait à une vue ordonnée les données de l'expérience semblaient découler directement de l'expérience elle-même", comme en témoigne la manière dont Newton décrivait ses

arrangements expérimentaux avec un luxe de détails (67). Newton avait développé - cela fait partie de la méthode telle qu'il l'exposa, par-delà ses propres réalisations en physique - une épistémologie accordée à son approche scientifique. Mais cette épistémologie reposait sur ce qu'Einstein a, pour sa part, dénoncé sans relâche comme l'illusion empiriste : croire que les concepts scientifiques sont directement connectés à l'expérience des sens, et qu'ils peuvent en être tirés par induction, alors qu'ils sont toujours l'objet de médiations abstraites, élaborées par la pensée, sans qu'une nécessité *logique* immédiate contraigne cette dernière. L'épistémologie anti-inductionniste qu'Einstein développa essentiellement après avoir élaboré la relativité générale (et qui, soit dit en passant, le fait différer de Mach ou des empiristes logiques), doit sans aucun doute à la méditation des conventionnalistes et notamment de Poincaré (mais, par son réalisme, Einstein diffère du simple conventionnalisme).

Vis-à-vis des idées épistémologiques, Einstein semble professer une conception assez semblable à celle par lui exposée à propos des idées scientifiques dans ses évocations de leur évolution historique. Certains concepts, certaines idées, avancés à une époque donnée parce qu'ils paraissent homogènes aux représentations ou en accord avec l'expérience du temps, en viennent, dans la mesure où ce ne sont que des constructions de l'esprit, des "libres créations" - libres, du point de vue logique, par rapport à l'expérience - , à s'avérer insuffisants. La profession de foi de Newton pour un empirisme inductionniste était homogène (jusqu'à un certain point) aux concepts de sa théorie. Comme Einstein l'expose dans son texte de 1933 "Sur la méthode de la physique théorique" (72), Newton "croyait que les concepts fondamentaux et les lois de son système pouvaient être dérivés de l'expérience. C'est, sans nul doute, ce qu'il voulait dire avec son *hypotheses non fingo* ". Et les concepts d'espace, de temps, de masse, d'inertie, de force, ainsi que les lois qui leur étaient relatives, y compris celles qui devaient être établies par la physique pour l'expression des diverses forces, de la gravitation à l'électromagnétisme, semblaient être directement tirées de l'expérience. L'espace absolu, l'action à distance, posaient à cet égard, comme on l'a vu, un problème. Mais le succès rencontré par la physique théorique dans la ligne du programme newtonien, aux dix-huitième et dix-neuvième siècles, ont contribué à conforter cette conception et empêché les physiciens de cette période "de reconnaître le caractère de construction fictive des fondements de son système" (73).

La relativité générale joue à cet égard, pour Einstein, un rôle de révélateur épistémologique. En effet, il s'agit d'une théorie alternative au système newtonien, rendant compte des mêmes faits empiriques et d'autres encore, sur des bases totalement différentes. Indépendamment du fait de savoir si l'une des théories est supérieure à l'autre, il suffit de constater que chacune est possible, tout en correspondant à un domaine empirique commun : ce qui prouve que les principes fondamentaux de l'une et de l'autre sont de caractère fictif (74) et, également, que "toute tentative de déduire logiquement les concepts de base et les postulats de la mécanique à partir d'expériences élémentaires se trouve vouée à l'échec" (75).

En quelque sorte, dans un système de pensée reliant les conceptions scientifiques à une épistémologie, caractéristique d'une époque donnée, le succès de la physique classique fondée sur le programme théorique de Newton et sur une épistémologie newtonienne dont elle se donnait pour solidaire, en même temps qu'il faisait illusion sur le caractère absolu ou naturel de ses concepts et principes,

masquait la nature de ses véritables fondements épistémologiques. Il y a, à nos représentations théoriques, une autre base épistémologique que la seule expérience : la construction rationnelle, la part de "libre invention" de nos théories, lesquelles, bien qu'ordonnées à la représentation de phénomènes empiriques, sont des constructions (donc des fictions) de la pensée.

C'est très vraisemblablement en rapport à cette différence essentielle de perspective, plus profondément encore qu'aux modifications conceptuelles et théoriques elles-mêmes, qu'Einstein écrivit son exorde : "Newton, pardonne moi ! la voie que tu as ouverte était la seule qu'un homme doué d'une intelligence lumineuse et d'un esprit créateur pouvait trouver à l'époque. Les concepts que tu as élaborés guident encore aujourd'hui nos raisonnements en physique, même si nous savons qu'il nous faut désormais les remplacer par d'autres concepts qui, plus éloignés de l'expérience directe, nous permettront seuls de parvenir à une compréhension plus profonde des relations entre les phénomènes" (76).

8. LE PROGRAMME FONDAMENTAL.

C'est toute la physique - et la science - contemporaine qui réclame une construction de concepts abstraits relativement éloignés de l'"expérience directe", et manifestement non dérivés par *induction* de celle-ci. Malgré tout, ce qui fait aux yeux d'Einstein le fond essentiel du programme newtonien demeure d'actualité : c'est la demande de *causalité stricte* et sa réalisation par l'approche différentielle, qui ont constitué la cadre directeur de son programme de la Relativité générale et de la recherche du champ unifié. Toutefois, il est un domaine de la physique contemporaine qui semble échapper à cette exigence : la théorie quantique, dont les succès ont paru mettre sérieusement en doute le bien-fondé de l'idéal de causalité, et de manière définitive, si l'on en juge aux débats et aux professions de foi qui l'ont accompagnée jusqu'à nos jours. On connaît les réticences avec lesquelles Einstein accueillait ces dernières, dans la mesure où elles prétendaient en finir avec les idées de causalité et de réalité physique. C'est l'année même de l'élaboration formelle de l'interprétation de la mécanique quantique qu'il écrit, à propos de la méthode newtonienne : "C'est seulement dans la théorie quantique que la méthode différentielle s'avère inadéquate, et que la causalité stricte nous échappe décidément. Mais le dernier mot n'a pas encore été dit" (77).

Ses propres critiques à l'égard de l'acception dominante des propositions et des concepts de la mécanique quantique (celle de l'Ecole de Copenhague) seront marquées, tout au long des années qui suivront, par l'exigence intellectuelle de maintien du réalisme physique et de la causalité, exigence exprimée par ce cri du cœur, qui conclut le même texte de 1927 : "Puisse l'esprit de la méthode de Newton nous donner la capacité de restaurer l'accord entre la réalité physique et ce qui reste le trait le plus caractéristique de l'enseignement de Newton : la causalité stricte".

Cette position détermina dès lors un clivage entre Einstein et le courant dominant de la physique, dirigé dans le sens de la mécanique quantique et longtemps dédaigneux à l'égard de la direction ouverte par la Relativité générale. Pour cette raison, Howard Stein (78) préfère comparer Einstein avec Huygens

plutôt qu'avec Newton ; car l'œuvre d'Einstein infuse la physique de notre temps plutôt qu'elle ne la domine - à la différence de celle de Newton. Cet auteur voit dans le programme du champ d'Einstein une limitation du même ordre que celle du mécanisme de Huygens. Abraham Pais émet une restriction analogue. Il estime que, malgré les modifications qu'ont rencontré les idées émises par Newton, il en est une qu'Einstein partagera toujours : la causalité. Se référant aux textes de 1927, Pais déclare qu'Einstein voulait en revenir à la vieille causalité stricte, celle de la définition extrêmement précise de la position et de la vitesse (79). Mais c'est là une acception restrictive de la causalité, et celle qu'Einstein pouvait alors revendiquer est sensiblement différente, ne serait-ce que par son rejet du concept de point matériel au profit de celui de champ comme fondamental. Les textes de 1927 sur Newton sont contemporains, certes, de l'établissement de la mécanique quantique et d'une épistémologie de l'indétermination, contre laquelle Einstein bataillera sans cesse (80), et la question d'une évolution ou non de sa conception sur la causalité et le déterminisme échappe au cadre de la présente étude.

Contentons-nous d'indiquer ici, tout d'abord, qu'il serait utile d'examiner comment c'est, au-delà de la simple exigence de *causalité*, celle de *complétude théorique*, qui en est en quelque sorte la quintessence et le terme ultime, dont il a rencontré en Newton les prémisses, comme on l'a vu, qu'Einstein définit pour sa part l'idéal qu'il convient de proposer à la recherche théorique ; et comment c'est autour de cette exigence que s'articulent et son propre travail théorique et ses critiques des théories proposées. Indiquons aussi qu'Einstein, même en prônant l'esprit de la causalité de Newton, ne fut en aucun cas un défenseur du maintien des concepts de la physique classique, ni même du programme de celle-ci tel que nous l'avons évoqué plus haut, en sorte que les restrictions du genre de celles apportées par Stein et par Pais ne semblent pas s'imposer : il est possible de comprendre les critiques d'Einstein à l'interprétation dominante de la mécanique quantique tout autrement que comme un simple retour à une exigence dépassée de la théorie classique.

A cet égard, le tribut par lui rendu à l'apport de Newton, en physique comme en épistémologie, ne doit pas faire illusion. Ce tribut, en tout état de cause, est à verser au dossier toujours ouvert de la question de la continuité ou de la rupture entre des représentations scientifiques qui se succèdent dans le temps.

REMERCIEMENTS

Je remercie John Stachel et l'équipe des *Collected papers of Albert Einstein* pour leur hospitalité à l'université de Boston, ainsi que l'Université hébraïque de Jérusalem pour l'autorisation de citer un texte inédit d'Einstein.

NOTES.

1. Howard Stein (1979) propose de le considérer plutôt comme le "Huygens de notre temps", pour des raisons liées à la nature de son programme théorique, différent de celui qui domine la physique actuelle. Nous en reparlerons plus loin.

2. Newton 1931. "Do not bodies act upon light at a distance, and by their action bend its rays ; and is not this action (*ceteris paribus*) strongest at the least distance ?"
3. Whittaker 1931,p. ix-xii.
4. Whittaker ne s'arrête qu'à la Relativité générale. Pour la Relativité restreinte, il s'en tenait apparemment à la formulation de Lorentz et de Poincaré qui maintenait une conciliation avec les concepts newtoniens, et allait jusqu'à dénier tout intérêt propre et toute originalité au travail d'Einstein de 1905 (Whittaker 1953).
5. Stein 1979.
6. Pais 1982,p.15.
7. Einstein 1921 b,p. 240.
8. Dans un article du *Times* de Londres, après l'observation de l'éclipse qui confirmait la prédiction de la Relativité générale sur la courbure des rayons lumineux au voisinage du Soleil : Einstein 1919, p.227.
9. Einstein 1930,p. 608.
10. Einstein 1921b, 1927a, 1946, etc...
11. Einstein 1921 a.
12. Einstein 1920 (inédit, paragraphe 15. Souligné par moi, M.P.)
13. Voir plus bas.
14. Dans l'inventaire de la bibliothèque d'Einstein telle qu'elle se trouvait à Princeton au moment de sa mort, on trouve les *Principia*, l'*Opticks*, et de nombreux ouvrages sur Newton et sur la physique classique. Dans une préface à un livre sur l'auteur des *Principia*, Einstein insiste, à propos de la bibliothèque de Newton, sur l'intérêt de savoir quels sont les auteurs qui l'ont inspiré, comme aussi ceux qu'il n'a pas lus (Einstein 1931a). Ce qui, soit dit en passant, souligne l'intérêt d'Einstein pour l'histoire des sciences et de la pensée. Nous pourrions reprendre la remarque à notre tour et l'appliquer à lui-même. Le catalogue de sa bibliothèque est tout à fait passionnant et révélateur, mais il est sûrement incomplet, étant donné les divers déménagements d'Einstein, et surtout le dernier, où il dut abandonner précipitamment l'Allemagne pour Princeton. Bien que sa bibliothèque de Berlin aît pu être préservée, elle ne l'a probablement pas été en totalité.
15. Einstein 1931 b.
16. Einstein 1927 a, p. 201.
17. "...Le destin l'a placé à un tournant décisif du développement intellectuel du monde. Cela s'impose à nous dès que nous nous souvenons qu'avant Newton il n'existait aucun système d'ensemble de la causalité physique susceptible de rendre compte des caractères les plus profonds du monde de l'expérience concrète" (Einstein 1927 a, p. 201).
18. Einstein 1927 a,p.204.
19. En fait, un télégramme adressé à la *Royal Society* pour le bicentenaire, reproduit dans la revue *Nature* : Einstein 1927 d.
20. Voir encore, sur ce thème, Einstein 1946 (tr.fr.,p. 24.)
21. Einstein 1931 b
22. Pais 1982, p. 14.

23. Einstein 1931 b.
24. Einstein 1921 b.
25. A cet égard, selon Françoise Balibar, "la Mécanique de Newton est l'introduction obligée à la lecture de l'oeuvre d'Einstein" (Balibar 1964,p. 75).
26. Einstein 1927 b, p. 249.
27. Einstein 1927 b, p.250. Il s'agit de la masse comme quantité de matière des corps, définition critiquée par Mach et par Poincaré, qu'Einstein lut très tôt.
28. *Ibid* . Einstein parle du "remarquable pouvoir d'abstraction que suppose l'obtention de lois différentielles générales par un processus de deux passages à la limite, dans le cours duquel le concept de masse devait en outre être inventé".
29. Cf. p. ex. Einstein 1921 a.
30. Einstein 1954, in 1954 c, p.350.
31. Balibar 1984, p.104-105.
32. Voir les nombreux exposés où Einstein expose les conceptions de la mécanique classique et celles de la relativité.
33. Einstein 1930,p.608. Cf. également Einstein 1924, p.85-88.
34. Einstein 1921 b.
35. D'où l'intérêt pour l'hypothèse qu' Einstein appela "principe de Mach", où les masses inertiales sont rapportées à des mouvements relatifs non pas par rapport à l'espace absolu, mais par rapport à la totalité des masses des corps pondérables de l'univers.
36. Sur l'expérience du seau, cf. p. ex. Einstein 1946, (p.26-27 de l'original).Voir aussi Einstein 1927 c.
37. Einstein 1921 c, p. 783. Voir aussi Einstein 1954 a, p. XIII-XIV.
38. Einstein
39. Einstein 1930, p. 608-609.
40. Einstein 1930, p. 609.
41. Einstein 1930, p. 609. Einstein a indiqué clairement, et dès un texte de 1910 (Einstein 1910, p. 7), que l'espace absolu de Newton est vide, sans matière, et en particulier sans éther : ceci notamment en raison de sa théorie de l'émission lumineuse (caractère corpusculaire de la lumière) ; alors que ce sont la théorie ondulatoire de la lumière, puis la théorie électromagnétique, qui ont introduit l'éther dans l'espace, à la différence de Newton.
42. Voir la note 41.
43. Einstein 1930,p. 610.
44. Einstein 1927 b, p. 254.
45. Einstein 1927 b, p. 254.

46. La modestie d'Einstein ne doit pas nous faire nous méprendre sur l'importance qu'il y avait à tirer les pleines conséquences conceptuelles de la notion de champ : mais tel fut bien en effet le rôle de la relativité restreinte.

47. C'est le sens d'un passage suggestif : Einstein 1930, p. 609.

48. Einstein 1924.

49. Einstein 1930, p. 610.

50. Cette remarque est importante dans la mesure où, pour Einstein - telle est, nous le verrons, la motivation profonde de son programme pour la théorie physique - l'unification est un aspect de la causalité.

51. Einstein 1927 b, p. 248-249 (souligné par Einstein).

52. *Ibid.* , p. 248.

53. *Ibid.* , p. 249.

54. Einstein n'entre pas dans la question de priorité entre Newton et Leibniz : ce qui est important, souligne-t-il, "c'est qu'il était indispensable pour Newton de les perfectionner (les méthodes mathématiques), puisqu'elles seules pouvaient lui fournir les moyens d'exprimer ses idées" (*Ibid.*, p. 249.)

55. Du moins, il en avait donné une première approche, que Descartes formulerait indépendamment de la gravité.

56. Einstein 1927 b, p. 249. Suit l'exposé (bref) de la stratégie de Newton formulant les concepts de force, de masse, etc... , dont nous avons parlé plus haut.

57. *Ibid.*, p. 250.

58. Einstein 1946, éd.fr., p.36.

59. Paty 1985, 1986.

60. Einstein 1927 b., p. 250.

61. Einstein 1946, tr. fr., p.25.

62. Einstein 1927 b, p. 251.

63. Einstein 1927 b ,p.251-252. Voir aussi Einstein 1933 (in Einstein 1954 c, p.266).

64. Einstein 1950, p. 62. Dans ce texte, Einstein souligne que l'action instantanée à distance résulte de ce que le concept fondamental est celui de point matériel, ou de particule, la matière étant supposée discontinue. Cette remarque est liée à sa critique des concepts de la mécanique quantique (cf. M. Paty, travail en préparation).

65. Einstein 1927 b, p. 252; voir aussi Einstein 1933.

66. Einstein 1927 b, p. 252.

67. *Ibid.*

68. "Cette brève description suffit à montrer comment les éléments de la théorie de Newton sont passés dans la théorie de la relativité générale, une fois que les trois défauts mentionnés ont été éliminés. Tout se passe comme si, dans le cadre de la théorie de la relativité générale, la loi du mouvement pouvait être déduite de la loi de champ correspondant à la loi de force newtonienne". Et

c'est seulement alors qu'il était "possible de parler d'une pure théorie du champ" (Einstein 1927 b, p. 254). C'est encore, expose Einstein dans le même texte, la mécanique newtonienne qui, appliquée non plus à des points matériels, mais à des distributions continues de masses, devait conduire au développement des équations différentielles partielles, qui allaient être le moyen d'expression de la théorie du champ. (*Ibid.*)

69. *Ibid.* , p. 253-254.

70. *Ibid.* , p. 254.

71. Einstein 1931 b, p. vii.

72. Einstein 1933, p.266.

73. Einstein 1933, p. 266-267.

74. L'argumentation, ramassée, rappelle celle de Duhem dans *La Théorie physique*.

75. Einstein 1933, p. 267.

76. Einstein 1946 ; tr. fr. p. 35.

77. Einstein 1927 d ; voir aussi Einstein 1927 b, p. 254-255.

78. Stein 1979.

79. Pais 1982, p. 15.

80. Paty 1986.

BIBLIOGRAPHIE.

(*Remarque* : j'ai indiqué les titres originaux et les traductions disponibles des textes d'Einstein en français ou en anglais. Les traductions françaises de ses oeuvres, lorsqu'elles existent - et mis à part celles, excellentes, de la correspondance avec Born et avec Besso -, sont défectueuses et j'ai souvent dû modifier la traduction dans les citations.)

BALIBAR, Françoise, 1984. *Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité*, Presses universitaires de France, Paris.

EINSTEIN, Albert, 1910. "Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne", *Archives des sciences physiques et naturelles* (Genève), XXX, 5-28 (paru originellement en français dans une traduction de E. Guillaume).

EINSTEIN, Albert, 1919 a. "What is the theory of relativity ?" *The London Times*, November 28, 1919 ; in Einstein 1954 c, p. 222-227. Original all^d. : "Was ist Relativitätstheorie ? ", in Einstein 1934 a, p. 127-131. Trad. fr. : "Qu'est-ce que la théorie de la relativité ?", in Einstein 1934 b, p. 206-214.

EINSTEIN, Albert, 1920. "Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt", Manuscrit inédit (Bibliothèque Pierpont Morgan, New York, cf. Archives Einstein).("Les idées fondamentales et les méthodes de la théorie de la relativité")

EINSTEIN, Albert, 1921 a. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie* , Vieweg, Braunschweig, 1922. Engl. tr. : *The Meaning of relativity : four lectures delivered at Princeton University* , Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1921. Trad. fr. : *Quatre conférences sur la théorie de la relativité*, Gauthier-Villars, Paris, 1955.

EINSTEIN , Albert, 1921 b. "On the theory of relativity" conférence à Londres, 1921 , in Einstein 1954 c, p. 240-243. Original allemand : "Über Relativitätstheorie", in Einstein 1934 a, p. 131-134. Trad. fr. : "Au sujet de la théorie de la relativité", in Einstein 1934 b, p. 201-206.

EINSTEIN, Albert, 1921 c. "A brief outline of the development of the theory of relativity", *Nature* ; CVI 782-784.

EINSTEIN, Albert, 1923. "Gründgedenken und Probleme der Relativitätstheorie", Conférence Nobel pour le prix de 1921, Göteborg, 11 Juillet 1923, in *Nobelstiftelsen*, Les Prix Nobel en 1923, Imprimerie Royale, Stockholm.

EINSTEIN, Albert, 1924. "Ueber den Äther", *Schweizerische naturforschende Gesellschaft, Verhandlungen*, 102 (2), 85-93.

EINSTEIN, Albert, 1927 a . "Isaac Newton", *Manchester Guardian* , March 19, 1927, 13-14 ; repr. in *Smithsonian Institution, Report for 1927*. (L'original allemand de ce texte est celui de Einstein 1927 b).

EINSTEIN, Albert, 1927 b. "Newtons Mechanik und ihr Einfluss auf die Gestaltung der theoretischen Physik", *Naturwissenschaften* 15, 273-276 ; engl. tr.: in Einstein 1954 c, p. 247-255 ; trad. fr. "La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique", in Einstein 1934 b, p. 180-193.

EINSTEIN, Albert, 1927 c. "Zu Newtons 200 Todestage", *Nord und Süd* , L, 36-40.

EINSTEIN, Albert, 1927 d. "Letter to the Royal Society on the occasion of the Newton bi-centenary", *Nature*, 119, 467.

EINSTEIN, Albert, 1930. "Address at the University of Nottingham", *Science*, LXXI (n° 1850), 608-610.

EINSTEIN, Albert, 1931 a. " Foreword", in de VILLAMIL, R., *Newton, the man* , Knox, London.

EINSTEIN, Albert, 1931 b. "Foreword", in Newton 1931.

EINSTEIN, Albert, 1932. "Bemerkungen über der Wandel der Problemstellungen in der theoretischen Physik", in *Emmanuel Libman anniversary volumes*, I, International Press, New York, p. 363-364.

EINSTEIN , Albert, 1933. "On the method of theoretical physics", The Herbert Spencer lecture, Oxford, June 10, 1933 ; in Einstein 1954 c , p. 265-270 ; tr. fr. "Au sujet de la méthode de la physique théorique", in Einstein 1934 b, p. 163-173.

EINSTEIN , Albert, 1934 a. *Mein Weltbild* , Querido, Amsterdam

EINSTEIN , Albert, 1934 b. *Comment je vois le monde.*, trad. de Einstein 1934 a, par le Colonel Cros, Flammarion, Paris.

EINSTEIN, Albert, 1942. "Isaac Newton", *Manchester Guardian*, 1942 ; repr. in Einstein 1950 b, p. 219 - 233 ; tr. fr. in Einstein 1954 d, p. 255-257.

EINSTEIN, Albert, 1946. "Autobiographisches. Autobiographical notes", in SCHILPP, P.A. (ed), *Albert Einstein , philosopher and scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 1- 95. Trad. fr. par Frédérique Lab : *Albert Einstein, Autoportrait* Ediscience, Paris. (Texte rédigé en 1946).

EINSTEIN, Albert, 1950 a. "On the generalized theory of gravitation", *Scientific American* , 188 (avril 1950, n° 4), 13-17.

EINSTEIN, Albert, 1950 b. *Out of my later years*, Greenwood Press, Westport (conn.) ; re-éd. 1970.

- EINSTEIN, Albert, 1954 a. "Foreword", in JAMMER, Max, *Concepts of space*, Harvard University Press, Cambridge, p. XI-XV.
- EINSTEIN, Albert, 1954 b. "Relativity and the problem of space", transl. by Robert W. Lawson, in 1954 c, p. 350-356.
- EINSTEIN, Albert, 1954 c. *Ideas and Opinions*, transl. by Sonja Bergmann, Crown, New-York, 1954. Ré-éd. Dell, New-York, 1981.
- EINSTEIN, Albert, 1954 d . *Conceptions scientifiques, morales et sociales*, trad. par Maurice Solovine, Flammarion, Paris, 1954.
- NEWTON, Isaac, 1687. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londres.
- NEWTON, Isaac, 1931. *Opticks or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light* , reprinted from the fourth edition with a foreword by prof. Albert Einstein and an introduction by prof. T. Whittaker, Bells and sons, London.
- PAIS, Abraham, 1982. *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford.
- PATY, Michel, 1985 . "Einstein et la complémentarité au sens de Bohr", *Revue d'histoire des sciences* 38,1985 (N° 3-4), 325-351.
- PATY, Michel, 1986 . "The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics", *Israel Colloquium on history and philosophy of science* (sous presse).
- STEIN, Howard, 1979. "On Newton and Einstein", in LEWIS, Albert C. et al., *Albert Einstein : four commemorative lectures*, The Humanities Research Center, The University of Texas, Austin.
- WHITTAKER, Edmund T., 1931. "Introduction", in Newton 1931.
- WHITTAKER, Edmund T., 1953. *A History of the theories of aether and electricity, vol 2 : The Modern theories, 1900- 1926*, Nelson, London.